ROY K. MARSHALL [1]

EL UNIVERSO VISTO POR UN ASTRONOMO

Las impresiones iniciales de nuestros remotos antepasados con respecto a los cielos se hallaban inextricablemente entremezcladas con sus religiones y supersticiones, algunas de las cuales se prolongaron hasta el siglo XVI, cuando era muy corriente, en las representaciones diagramáticas del universo, colocar en el borde exterior una extraña región en la que se situaba una fuente mágica de energía, el *primum mobile*. Todavía hoy, el ciudadano corriente suele inquietarse al pensar por qué la tierra sigue girando sobre su eje y describiendo su movimiento de traslación alrededor del sol. No sabe que Galileo explicó esencialmente los movimientos del universo en una serie de enunciaciones que pueden condensarse en ésta: "¿Qué es lo que ha de detenerlos?"

La característica sobresaliente del universo tal como lo conocemos hoy es el espacio vacío. Desde el punto de vista práctico, está completamente vacío. La densidad media del universo es menor que la del aire normal por un factor de por los menos de 10^{18}. Con los más grandes telescopios del mundo, puede penetrarse el espacio para ver objetos situados a distancia de mil millones de años luz, lo que equivale a más de 5×10^{21} millas, y este mismo hecho es una prueba admirable del vacío esencial del espacio entre las aglomeraciones de

[1] Roy K. Marshall, doctorado en Filosofía en la Universidad de Michigan (Estados Unidos), en 1932, es director del Fels Planetarium del Instituto Flanklin de Filadelfia y ha sido astrónomo del Observatorio Cook de la Universidad de Pensilvania desde 1940. Es director científico del *Evening Bulletin* y está interesado en empresas de radio y televisión, habiendo organizado programas científicos en la red de la N. B. C. Es miembro de la American Astronomical Society, de la Royal Astronomical Society del Canadá, de la British Astronomical Association y correspondiente de la Royal Astronomical Society de Londres. Ha escrito extensos trabajos sobre astrofísica y análisis espectroscópico. *(N. del editor.)*

materia, las cuales, a su vez, consisten en pequeñas masas de materia separadas por grandes distancias.

Este cuadro de un universo abiertamente espaciado nos ha sido impuesto por la abrumadora evidencia de la observación. Un examen casual de un objeto situado en el cielo no permite juzgar ni el tamaño ni la distancia, y los primeros observadores hubieron de limitarse a especular en cuanto a la posibilidad de que las minúsculas y titilantes estrellas pudieran ser en realidad grandes cuerpos como el sol, cuya importancia aparente sólo era disminuída por la distancia. Los cálculos primitivos sobre la distancia de la luna en términos de la del sol se derivaron de las observaciones de las fases de la luna, y éstas, añadidas a la comprensión de la causa de los eclipses de sol, permitieron establecer el hecho importante de que las distancias de varios objetos eran diferentes.

La primera medida de la circunferencia de la tierra fué llevada a cabo por Eratóstenes de Alejandría, hace cerca de veintidós siglos, utilizando un método fundamentalmente sensato y precisamente el que se emplea hoy con fines similares. Un siglo después, Hiparco calculó la distancia de la luna como cincuenta y nueve radios de la tierra, cálculo que se aproxima mucho a la verdad. Este resultado, combinado con la proporción de las distancias de la luna y del sol obtenida por Aristarco, determinó una valoración de aproximadamente mil doscientos radios de la tierra en cuanto a la distancia del sol, resultado que fué prácticamente aceptado por todos hasta principios del siglo XVII. Entonces, aunque se creía que el cálculo era erróneo, los únicos cambios que se introdujeron fueron arbitrarios y no se basaban en la observación.

Adentrado ese siglo, las observaciones realizadas por una expedición francesa permitieron a Domenico Cassini, del Observatorio de París, asignar a la distancia del sol un valor equivalente a 360 veces la distancia de la luna, o sea aproximadamente 10 por ciento menos que el valor moderno, fijado en poco más de 23,500 radios de la tierra.

Las distancias relativas de los planetas quedaron bien establecidas cuando Juan Keplero, a principios del siglo XVII, enunció las leyes de los movimientos planetarios, a las que Isaac Newton, en fecha posterior del mismo siglo, encontró justificación matemática. Con el descubrimiento de la ley de gravitación y el invento del cálculo, se hizo posible establecer la especulación acerca de los planetas sobre una base más firme y determinar sus distancias del sol en términos de la distancia de la tierra. De este modo, a fines del siglo pudo trazarse con bastante exactitud el mapa del sistema solar tal

como se conocía entonces, incluyendo a los planetas Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno.

Más allá de los planetas se encuentran las estrellas, pero hasta 1838 no fué medida ninguna distancia estelar. Cierto es que el danés Tico Brahe había tratado de medir sus desplazamientos paralácticos, y el fracaso de la empresa le sirvió de razón principal para rechazar la teoría heliocéntrica copernicana respecto al ordenamiento del sistema solar. Si la tierra gira alrededor del sol —razonaba Tico Brahe— deberíamos ver a las estrellas más próximas desplazarse con respecto a las más distantes. Sus instrumentos eran los mejores que se producían en aquella época, pero no consiguió percibir el desplazamiento que según sabemos hoy, es en el mejor de los casos sólo el 1 ó 2 por ciento de la medida más pequeña de Tico Brahe. Sin embargo, las extraordinarias medidas de Tico Brahe permitieron a Keplero basar sus trabajos para prescindir de la teoría de los círculos que se había adoptado, aunque en vano, para explicar los movimientos no uniformes de los planetas. Los firmes resultados obtenidos por Keplero, junto a las observaciones que hizo Galileo, con su nuevo telescopio, de las fases de Mercurio y Venus, y su descubrimiento de los satélites de Júpiter, que giraban alrededor del centro que no era la tierra, sirvieron para que la balanza se inclinara en favor de la teoría heliocéntrica.

La primera prueba del movimiento de la tierra alrededor del sol se tuvo en 1725, cuando James Bradley intentó determinar los desplazamientos paralácticos estelares, descubriendo, en cambio, la aberración de la luz, que suele compararse tradicionalmente con el fenómeno de la inclinación de un paraguas en la dirección del movimiento. La velocidad finita de la caída de las gotas de lluvia puede combinarse con la rapidez del movimiento de la persona que lleva el paraguas para determinar la inclinación que éste debe tener a fin de proteger de la lluvia a la persona. Si el paraguas es llevado verticalmente, la persona recibirá en su cuerpo algunas de las gotas de lluvia.

De análoga manera, es menester inclinar hacia adelante el telescopio, en la dirección del movimiento de la tierra alrededor del sol, para asegurarse de que la luz procedente de una estrella pasará sin obstáculos a través del tubo del instrumento. En realidad, esto no tiene tanta importancia, porque la estrella puede ser vista aún con un telescopio no inclinado, pero resulta desviada en una cifra máxima de más de 20 segundos de arco, a causa de la proporción finita de la velocidad de la tierra en su órbita y de la velocidad de la luz. En 1728 se le ocurrió a Bradley la explicación correcta de la aberra-

ción. Se admite generalmente que el fenómeno de la aberración no tiene otra explicación plausible que el movimiento anual de la tierra alrededor del sol, por lo que su descubrimiento constituyó la confirmación de la teoría heliocéntrica.

Las primeras medidas de los paralajes estelares fueron hechas en 1838 y 1839 por Strube en Dorpat, Bessel en Koenigsberg y Henderson en el Cabo de Buena Esperanza. Todas sus apreciaciones se distanciaban un tanto de la verdad, calibrada según los métodos modernos, pero las dimensiones estaban dentro del acierto y pueden aceptarse como la segunda prueba de la revolución de la tierra alrededor del sol. El diámetro de la órbita casi circular de la tierra es de 186.000,000 de millas. Las observaciones de una estrella cercana, partiendo de los dos extremos de un diámetro, deben descubrir un desplazamiento mensurable con respecto a las estrellas más distantes. El desplazamiento en cuanto a la estrella más próxima es tal, que la distancia de la estrella equivale a 275,000 veces la distancia de la tierra al sol. Hoy día se han determinado las distancias de varios miles de estrellas utilizando este método trigonométrico.

Se tuvo una tercera prueba del movimiento de traslación de la tierra con la aplicación del efecto Doppler-Fizeau llevada a cabo por Huggins en Inglaterra y por Vogel en Potsdam. En los espectros de las estrellas se desplazan las líneas cambiando la distancia desde la tierra. Parte de este desplazamiento, que es constante tratándose de una estrella ordinaria no estorbada por alguna compañera, se debe al movimiento de la estrella con respecto al sol. El resto es una suma variable que repite su variación en un período anual y que se debe al movimiento de la tierra. En una estación del año podemos estar acercándonos a una estrella dada, y seis meses después nos apartaremos de ella. La cifra de la variación del desplazamiento de las líneas del espectro en la luz de la estrella es una medida de nuestra velocidad en nuestra órbita alrededor del sol. Si, como es el caso, viajamos en nuestra órbita a una velocidad de $18\frac{1}{2}$ millas por segundo y se necesita un año de segundos para que completemos este ciclo, podemos multiplicar $18\frac{1}{2}$ por el número de segundos que tiene el año para obtener la circunferencia de la órbita terrestre, y, por ende, la distancia del sol. Este valor sirve para cotejar los que se obtienen por otros procedimientos.

El descubrimiento de otros planetas —Urano, en 1781, por William Herschel; Neptuno, en 1846, por Galle, de Berlín, como resultado de la obra matemática de Leverrier (mientras el inglés John Couch Adams hacía por su cuenta cálculos que casi pasaron inadvertidos) y de Pluto, en 1930, por Tombaugh, guiado por los cálculos

de Lowell (también en este caso trabajó independientemente el casi ignorado William Pickering) sirvió para ampliar nuestras ideas del sistema solar. Ahora se sabe que los cometas que se zambullen en la proximidad del sol durante breves semanas viajan incluso más allá que los más distantes planetas, y se sabe también que los miles de planetas menores o asteroides —e incontables miríadas de meteoroides— describen su curso a través de lo que antes se creía que eran regiones no habitadas por ningún miembro regular de nuestro sistema.

Ese mismo Herschel que fué el primero en descubrir un planeta en los tiempos históricos, fué también el primero que examinó metódicamente el sistema sideral con el propósito de descubrir la extensión y ordenamiento del universo. Ideó y utilizó un método estadístico que, en esencia, es el que se usa hoy para espigar los materiales de observación con el mismo fin. Herschel se percató de que era inútil entregarse a un programa de examen íntimo de cada una de las zonas del firmamento o incluso de la porción que para él era visible en la alta latitud septentrional de Inglaterra. Contó las estrellas en regiones celestes seleccionadas un tanto al azar, pero con cuidadosa atención, y descubrió que el número de las estrellas por área variaba de una región a otra. Llegó a la conclusión de que nuestro sistema de estrellas, aunque lleno de irregularidades, concentraciones y racimos que desafiaban toda descripción exacta, tiene *grosso modo* la forma de disco, con la dirección más extensa marcada bastante claramente por la Vía Láctea. Además, el número de estrellas tenues aumenta notablemente a medida que nos acercamos a la Vía Láctea. Herschel tuvo que suponer que, en general, las estrellas son de la misma luminosidad intrínseca y que la aparente falta de brillantez debe atribuirse a la gran distancia. El incremento del número de estrellas tenues significaba, pues, que en la dirección de la Vía Láctea las estrellas se extendían a mayores distancias. La misma Vía Láctea es irregular, y en la dirección de la parte situada por encima del horizonte meridional de Inglaterra es donde se encuentran las concentraciones más densas de estrellas. Herschel estableció el método y las indicaciones generales de un sistema finito de estrellas, una de las cuales es el sol. Hoy día nuestras dimensiones son diferentes, pero la idea esencial es la misma.

Las medidas modernas, sujetas sin duda a alguna revisión pero no alejadas substancialmente de los valores correctos, revelan que nuestro sol es una de los cien mil millones de estrellas distribuídas a través de un volumen de espacio toscamente globular y de un diámetro perteneciente al orden de los cien mil años luz, aproximadamente 6×10^{17} millas. Casi todas estas estrellas se hallan concentradas en una región discoidal de la gran dimensión precedente, pero con un promedio de

espesor de sólo unos 15,000 años-luz. Nuestro sol se halla situado a unos 30,000 años-luz del centro del disco, en el cual hay un considerable abultamiento nuclear y una notable congestión si se compara con la región donde está el sol. Alrededor del disco, llenando el volumen globular del que es un plano ecuatorial, se encuentran diseminadas unos cuantos cientos de millones de estrellas, así como unas docenas de racimos globulares de estrellas, cada uno de los cuales consta acaso de un millón.

Además de las estrellas, hay por lo menos una masa igual de material diseminado a través de esta región discoidal en forma de electrones, iones, átomos, moléculas y hasta partículas semejantes a polvo.

Parte de este material es luminoso porque dispersa y refleja la luz de las estrellas vecinas, o bien resplandece mediante un proceso de fluorescencia, absorbiendo la radiación ultravioleta de las estrellas incandescentes y emitiendo la energía en forma visible. Otras regiones de este material no aparecen iluminadas, pero revelan su presencia al oscurecer a las estrellas que se encuentran más allá. Aunque tales estrellas quedan oscurecidas también aparecen, por fortuna, enrojecidas, y los espectros de las estrellas pueden indicarnos sus colores, mientras que la cantidad de enrojecimiento puede revelarnos algo del volumen de material que se encuentra entre nosotros y ellas. Este gas y polvo interestelar convierte en un problema interesante la tarea de escudriñar los bordes de nuestro sistema o galaxia de la Vía Láctea. Aquí y allá encontramos pequeñas ventanas a través de las cuales pueden verse estrellas relativamente no oscurecidas, y el estudio de estas regiones permite delinear el sistema.

Este sistema o galaxia estelar gira sobre un eje que, como cabría sospechar, es perpendicular al plano del discoide. Como primera aproximación, el modo de rotación es similar al del sistema solar: los cuerpos cercanos al centro ejecutan sus revoluciones alrededor de ese centro en períodos más cortos. Lo mismo debe ocurrir en cualquier sistema en el que hay una concentración de masa hacia el centro. Las estrellas que se encuentran entre nosotros y el centro se nos adelantan y nosotros adelantamos a las estrellas que se encuentran más lejos del centro que el sol. Nuestra velocidad alrededor del centro (movimiento que se efectúa en la dirección de la cola del Escorpión, precisamente por encima del horizonte en la parte septentrional de los Estados Unidos, en los atardeceres de julio) es de unas 150 millas por segundo, y, a nuestra distancia del centro, una revolución requiere alrededor de 200.000,000 de años.

Este género de movimiento garantiza que una fotografía de nuestra galaxia tomada desde fuera revelará una estructura diferente a

medida que pasa el tiempo. Las porciones situadas más al exterior quedan rezagadas con respecto a la región nuclear. Casi todas las estrellas tienen su movimiento individual. Nuestro sol se mueve con respecto a sus vecinos a una velocidad de 12 millas por segundo, en una dirección no muy distante de la de la brillante estrella Vega. Cada estrella gira alrededor del centro del sistema siguiendo un curso no circular, en forma parecida a la de los cometas girando alrededor del sol. La congestión que cabría esperar teniendo en cuenta que todas las órbitas estelares pasan cerca de la región nuclear no llega a producirse porque las estrellas viajan más de prisa e invierten menos tiempo en la proximidad del núcleo. Esto es claramente parecido a lo que ocurre con el sistema cometario: si bien la población total puede ser elevada, en cualquier momento un volumen dado de espacio es ocupado por muy pocos cometas, aun en la proximidad del sol, donde cada uno de ellos debe retornar periódicamente.

Las ideas de Herschel respecto a la configuración general de nuestra galaxia han sido ampliamente confirmadas por las observaciones modernas, pero las dimensiones rebasan con mucho todo lo que él hubiera estado dispuesto a admitir. Durante sus investigaciones, Herschel se interesó especialmente por las nebulosas y los racimos de estrellas. Sus más grandes telescopios le permitieron resolver fácilmente algunos objetos en estrellas individuales, mientras que otros eran objetos amorfos en los cuales no podían ser vistas las estrellas individuales ni aun con sus lentes amplificadoras de la máxima potencia. Se inclinaba a creer que también estos objetos, con instrumentos suficientemente grandes, podrían resolverse en estrellas; pero en la segunda mitad del siglo XIX se probó que muchos de ellos eran verdaderamente objetos gaseosos, verdaderas nebulosas. Sus espectros no eran los que se hubieran obtenido tratándose de conglomerados de estrellas, sino, por el contrario, espectros emitidos por gases a baja presión. Otros, en cambio, revelaban espectros semejantes a los procedentes de racimos de estrellas, pero ni aun con los mejores telescopios podían descubrirse las estrellas individuales. Estos objetos forman lo que hoy llamamos galaxias. Muchas de ellas han sido resueltas en estrellas y contamos con numerosos indicios de que también las otras están formadas por estrellas, aunque hemos de confesar, a nuestra vez, que nuestros instrumentos no son capaces de ejecutar la resolución, tan grandes son las distancias a que se encuentran estas galaxias.

Cuando dejamos atrás nuestro sistema de la Vía Láctea y empezamos a estudiar las otras galaxias, esbozamos por primera vez la estructura del universo. Es posible que existan grados superiores de

organización, y teniendo en cuenta esta posibilidad Harlow Shapley habla del volumen observable del espacio denominándolo la metagalaxia. Sea que lo consideremos como la metagalaxia o como el universo observable, el volumen de espacio que podemos examinar con nuestros más grandes telescopios tiene como partículas las galaxias.

Las dos galaxias externas más próximas son de forma irregular y fácilmente visibles a simple vista, presentándose como porciones brillantes separadas de la Vía Láctea. Sólo pueden verse desde las latitudes meridionales y se las conoce como las Nubes de Magallanes. Cuando estudiaba las estrellas de las Nubes de Magallanes fué cuando Henrietta Leavitt, del Observatorio de Harvard, descubrió la primera clave para precisar las distancias de éstas y otras galaxias.

En estas nubes hay un gran número de estrellas variables, cuyo brillo cambia de manera muy definida, lo que hace posible adscribirlas a la clase de estrellas variables llamadas Cefeidas. Por las distancias estadísticamente calculadas de las Cefeidas de nuestra propia galaxia, contamos hoy con una relación entre el período y la luminosidad intrínseca de las variables Cefeidas que constituye un instrumento de la máxima importancia para determinar las distancias de las galaxias.

Miss Leavitt observó que las Cefeidas de la pequeña Nube de Magallanes podían ordenarse en un gráfico en el que el período de variación es contrastado con la brillantez aparente media. Hizo el razonamiento de que la Nube estaba muy distante de nosotros en comparación con su espesor, debido a lo cual podíamos considerar todas estas Cefeidas como situadas aproximadamente a la misma distancia de nosotros. De ser así, tenía que prevalecer la relación entre período y luminosidad *real*. Algunas estrellas no variables de la Nube eran de tipos conocidos en nuestra proximidad y podía suponerse que sus luminosidades intrínsecas eran las mismas que las de las estrellas cercanas. Esto proporcionó los cálculos iniciales en cuanto a la distancia de la Nube. Los cálculos de las distancias de las Cefeidas más próximas de nuestra galaxia dieron un cero-punto que coincidió con lo que se requería en cuanto a las Cefeidas de la pequeña Nube de Magallanes para situarlas a la distancia sugerida por las estrellas no variables de tipos discernibles.

Como resultado general, hoy disponemos de una curva de relaciones entre luminosidades intrínsecas y períodos de las estrellas variables Cefeidas, dondequiera que las encontremos en el universo. Si descubrimos una Cefeida en otra galaxia, podemos reconocerla por su regularidad de variación y por la forma de su curva de variación. Podemos observar su brillantez máxima y mínima y establecer la

media. Claro está que se trata de la brillantez media observada o *aparente*. Por la longitud del período, podemos determinar la brillantez media *intrínseca,* consultando la curva período-luminosidad que tenemos a nuestra disposición. Conociendo el brillo aparente de la estrella y su brillo real, podemos calcular su distancia por medio de una simple fórmula algebraica.

De esta manera han sido determinadas las distancias de algunas de las galaxias próximas, porque, por fortuna, contienen estrellas variables Cefeidas perfectamente discernibles. Pero las Cefeidas no figuran entre las estrellas más brillantes. Se supone que estas últimas, por lo que se refiere a las galaxias más próximas, son de las mismas luminosidades intrínsecas que las más brillantes estrellas conocidas de nuestra galaxia y de las Nubes de Magallanes. Su brillantez, según las observamos, es comparada con la brillantez intrínseca probable, y las distancias se cotejan con las derivadas de las Cefeidas. Por lo menos, coinciden bastante bien cuando consideramos las suposiciones que deben hacerse. Existe la posibilidad de que algunas estrellas de nuestra galaxia puedan proyectarse ante otra galaxia, de modo que se rechazan las pocas estrellas brillantísimas de una galaxia antes de sacar la media de la brillantez aparente de las siguientes estrellas brillantes.

Cuando hemos derivado así las distancias de unas cuantas docenas de galaxias utilizando las Cefeidas variables y otras estrellas identificables de la misma constelación, podemos empezar a determinar correlativamente las distancias de galaxias dotadas de brillantez total aparente y de dimensiones aparentes. Cuanto más distante se encuentra una galaxia, más débil y más pequeña parecerá. Esta clase de correlación da buen resultado tratándose de las docenas de galaxias cuyas distancias han sido medidas más o menos directamente y que se encuentran a lo largo de líneas rectas cuando contrastamos la distancia con la brillantez aparente o con el diámetro aparente. Así establecemos la suposición muy amplia pero al parecer justificable de que las galaxias son, por término medio, de la misma brillantez intrínseca total y de las mismas dimensiones generales.

Esta es la misma clase de suposición que estableció William Herschel acerca de las estrellas, y ahora sabemos que las estrellas siguen una escala, en cuanto a luminosidad intrínseca, desde las que son más débiles hasta las que son más brillantes que el sol, por factores del orden de 100,000 veces. La uniformidad de las galaxias es, sin embargo, mucho más grande que lo que eso hace suponer. Hay entre ellas, en lo relativo a la luminosidad, algunos supergigantes y algunos pigmeos; pero la mayoría se encuentran comprendidas dentro de una

escala de 1,000 veces, en comparación con los 10,000.000,000 de veces, por lo menos, que corresponden a las estrellas. En todas ellas, si se exceptúan unas 150, no podemos ver las estrellas individuales, por lo que hemos de recurrir a algún método estadístico para determinar las distancias de las galaxias remotas.

Es menester proceder con cuidado al establecer las medidas de la brillantez aparente. William Herschel reconoció un ordenamiento sistemático propio llamado "nebulosas blancas", a las que hoy llamamos galaxias. Se encuentran en mayor número cuando llegamos a la mayor distancia de la Vía Láctea, el velo estrellado que surca nuestro cielo. A medida que nos acercamos a los límites aparentes de la Vía Láctea, las galaxias empiezan a escasear, y, salvo en lugares muy especiales y muy próximos a la Vía Láctea, se advierte la ausencia de galaxias. Esta distribución preferencial con respecto a las estrellas de nuestro sistema contribuyó a impedir que se llegara antes a un acuerdo en cuanto a la naturaleza de estos objetos externos. Si su distribución estaba condicionada por la distribución de las estrellas de nuestro sistema, parecía razonable llegar a la conclusión, sin mayores pruebas, de que las galaxias no son sino pequeños objetos próximos a nuestro sistema y que en realidad forman parte integrante de él.

En 1885, se observó un brillante punto estelar cerca del núcleo de la galaxia de Andrómeda, que tiene forma de espiral. Ese punto se desvaneció a los pocos días y se hizo invisible. A partir de entonces, se han observado en muchas galaxias esos brotes de objetos estelares y el proceso es el mismo por lo que se refiere a las llamadas estrellas nuevas o temporales de nuestra propia galaxia. Estos objetos parecen poseer una especie de inestabilidad que los obliga al fin a despojarse de su superficie material en una breve pero sugestiva llamarada de exceso de energía, durante la cual vemos que su brillantez anterior aumenta quizás 10,000 veces. Como máximo, tales estrellas son unas 25,000 veces más brillantes que nuestro sol, dentro de una escala relativamente pequeña, y figuran entre las estrellas identificables que pueden utilizarse para determinar las distancias de las galaxias en las que han sido observadas.

Hacia 1925, Heber D. Curtis insistió en que estos estallidos de las galaxias externas eran como los de las estrellas nuevas o temporales y tal vez incurrió en precipitación al aceptar el carácter metagaláctico de las "nebulosas blancas" de Herschel. Hoy día no se abriga la menor duda en cuanto a que existen grandes conglomerados de miles de millones de estrellas, comparables en todos los sentidos al sistema de la Vía Láctea que es nuestra propia galaxia.

Ahora se sabe que la distribución sistemática, en la que se evita la propia Vía Láctea, se debe a la capa de material absorbente, al gas interestelar que se encuentra a través de la distribución discoidal de las estrellas de nuestra galaxia. No nos es posible ver más allá de los límites de nuestra galaxia, en la dirección de la Vía Láctea, pero resulta particularmente satisfactorio comprobar, por veintenas de fotografías que se han tomado de otras galaxias, que éstas se ven afectadas de manera análoga por el material interestelar. De extremo a extremo las cruzan barras oscuras, como cuando las vemos de canto. No podemos mirarlas por dentro, a lo largo de una línea que cubra su mayor extensión. Los observadores que se encontraran dentro de estas galaxias tampoco podrían mirar hacia afuera para observar nuestra galaxia.

Siempre que vemos en la Vía Láctea o cerca de ella gran número de galaxias sabremos que hemos encontrado una "ventana" a través del medio interestelar. Examinando las estrellas más distantes cerca de los bordes de estas ventanas podemos determinar la extensión máxima de nuestra propia galaxia. Fuera de ahí, es de temer que el material oscurecedor del medio interestelar haya viciado la brillantez aparente de las estrellas. Siempre resulta un tanto sorprendente saber que, en los polos de la Vía Láctea, tan lejos como es posible llegar para librarse de la espesa capa de material oscurecedor, las galaxias fotografiables con nuestros más potentes telescopios superan en número a las estrellas de nuestra propia galaxia.

Partiendo de los estudios que se han hecho con grandes telescopios de centenares de áreas seleccionadas, se ha calculado que, con el reflector de 100 pulgadas del Observatorio del Monte Wilson, podrían fotografiarse en todos los cielos aproximadamente 100.000,000 de galaxias, si en la nuestra no se presentaran los efectos oscurecedores. Si el espacio estuviera poblado uniformemente de galaxias y no existieran otros factores de perturbación, deberíamos estar en condiciones de fotografiar casi 1,000.000,000 de galaxias con el telescopio de 200 pulgadas de apertura del Monte Palomar. Las más lejanas se encuentran a una distancia de 1,000.000,000 de años-luz, aproximadamente 6,000 trillones de millas. Con una esfera de un radio de 1,000.000,000 de años-luz conteniendo otra vez 1,000.000,000 de galaxias, la densidad es de una galaxia por 10^{18} años-luz cúbicos. En general, podemos decir que las galaxias se encuentran separadas por un millón de años-luz.

Algunas de las que se encuentran en nuestra propia vecindad, se hallan más cerca. Las Nubes de Magallanes están tan próximas

que debemos considerarlas como satélites o compañeras de nuestra propia galaxia. La Nube Grande de Magallanes está a una distancia de 75,000 años-luz; la Nube Pequeña se encuentra a cerca de 85,000 años-luz de nuestro sol. Más allá de las Nubes de Magallanes, de forma irregular, reconocemos después a la galaxia llamada del Escultor, de carácter no nucleado pero ligeramente condensada en el centro, que se encuentra situada a una distancia de unos 250,000 años-luz. Una galaxia similar, en Fornax, está a una distancia aproximada de 500,000 años-luz, mientras que una galaxia irregular, a la que se ha designado NGC 6822 puede que se encuentre un poco más lejos. Otra galaxia irregular, la IC 1613, está a 900,000 años-luz.

Dos hermosas pero disímiles galaxias, en forma de espiral, se encuentran a unos 750,000 años-luz. Una de ellas, la M 33, aparece un tanto desperdigada e informe, en tanto que la otra, la M 31, es más compacta y brillante. La M 31 tiene dos compañeras, la M 32 y la NGC 205, que son de naturaleza amorfa y esferoidal y sólo recientemente y con dificultad se han resuelto en estrellas mediante el uso de la radiación infrarroja que elimina el efecto borroso de la luz esparcida por longitudes de ondas más cortas.

Incluyendo nuestro propio sistema de la Vía Láctea conocemos hoy, por consiguiente, once galaxias dentro de un radio de 1.000,000 de años-luz, lo que representa mucho más que el anterior cálculo de una galaxia por cada 10^{18} años-luz cúbicos. En nuestra vecindad, tenemos una densidad que es más del doble que la mencionada, pero claro está que en ello influye la selección de las observaciones. Algunas de las galaxias próximas que se conocen no se percibirían a distancias de algunos centenares de millones de años-luz. En efecto, las dos galaxias endebles, la del Escultor y la de Fornax, sólo fueron descubiertas por medio de estudios sistemáticos en los que por fortuna se emplearon placas fotográficas de extraordinaria sensibilidad.

Ambas parecen ser de un nuevo tipo de galaxia, grandes de tamaño, pero poco pobladas. Hay otras galaxias esferoidales, pero la densidad de estrellas es en ellas unas diez veces mayor que en estos dos sistemas. Las galaxias esferoidales pertenecen a la clase general denominada elíptica y que comprende en total aproximadamente el 17 por ciento de todas las galaxias. Algunas de las galaxias elípticas parece como si se vieran exactamente de canto, y entonces presentan formas de huso. Durante algún tiempo existió considerable confusión acerca de la verdadera naturaleza de estos objetos. En la reunión celebrada en 1941 por la American Astronomical Society, en el Observatorio Yerkes, se presentaron nuevas teóricas

de que las galaxias elipsoidales consistían en nubes de polvo que rodeaban estrellas extraluminosas. Dos o tres años después se hicieron fotografías en el observatorio del Monte Wilson, utilizando rayos infrarrojos, que resolvieron definitivamente algunos de esos objetos en estrellas individuales.

Aproximadamente el 80 por ciento de todas las galaxias son espirales de dos tipos aparentemente distintos, por el diverso grado de concentración y de apertura de la espiral. Existen espirales cruzadas, que consisten en un núcleo a través del cual corre una barra más o menos recta, desde los extremos de la cual salen los brazos de la espiral, toscamente concéntricos al núcleo. Las otras galaxias son las espirales normales, en las que los brazos salen directamente del núcleo.

El restante 3 por ciento de las galaxias corresponde al tipo de las Nubes de Magallanes, que son de estructura irregular.

Exceptuando estas pocas galaxias irregulares, las demás parecen poseer una simetría rotacional, y cuando se emplea el espectrógrafo, pueden percibirse y medirse las rotaciones. Las velocidades de rotación están dentro del orden de la velocidad que se encuentra en nuestra propia galaxia, de modo que todas ellas tienen, en relación con algún radio intermedio, un período de varios millones de años. Existía considerable confusión acerca de la dirección de rotación, porque en cuanto a muchas de las galaxias es imposible determinar qué lado está más cerca de nosotros. Sin embargo, por lo que se refiere a algunas de ellas, es evidente que tiene que estar más próximo uno u otro lado, porque el material interestelar oscuro se halla dispuesto de modo que puede proyectar su silueta sobre ciertos detalles de la estructura. Partiendo de lo observado en esas galaxias, se ha determinado con bastante precisión que una galaxia gira de modo tal que los brazos de la espiral quedan rezagados.

Existen algunos puntos de discrepancia entre diversas escuelas de observación y pensamiento por lo que se refiere a las galaxias. Por ejemplo, el observatorio del Monte Wilson (y presumiblemente el grupo del observatorio del Monte Palomar, que en muchos aspectos se superpone a la escuela del Monte Wilson) se refiere siempre a estos sistemas estelares externos denominándolos nebulosas. Claro está que no son nebulosas según la acepción corriente de los diccionarios, en lo que se dice específicamente que ciertos conglomerados lejanos de estrellas parecen ser nebulosas. La palabra "nebulosa" debe reservarse a las nubes gaseosas amorfas que brillan debido a la reflexión, dispersión o excitación fluorescente de la luz de las estrellas adyacentes. No debemos dejarnos influir

por las deficiencias de que adolecían los telescopios primitivos. La palabra "galaxia" corresponde desde luego, específicamente, a la Vía Láctea, pero hemos acuñado una frase que abarca todas las estrellas de nuestro propio sistema, algunas de las cuales dan origen a la apariencia visible de la Vía Láctea. Así lo llamamos el sistema o la galaxia de la Vía Láctea, o nuestra galaxia. A otros conglomerados que a los observadores que se encontraran dentro les llevarían a descubrir apariencias similares los llamamos galaxias, es decir, conglomerados de estrellas como el nuestro. En torno a estas cuestiones pequeñas y realmente insignificantes se desperdicia mucho tiempo y se engendra mucha confusión en la mente de la generalidad del público profano en la materia. La palabra "galaxia" en plural llegará a emplearse específicamente para designar los conglomerados estelares de miles de millones de estrellas, como aquel en que nosotros vivimos, y la palabra "nebulosa" debe reservarse específicamente para designar nubes de partículas tales como moléculas y átomos e incluso motas de polvo. Tal es el punto de vista de los astrónomos de la costa oriental de los Estados Unidos, particularmente de los del observatorio del Instituto de Harvard.

Entre los expertos de la costa del Pacífico y de la del Atlántico existe otro punto de discrepancia. El tipo de reflector del telescopio que se emplea en el Monte Wilson es potente para los análisis detallados; pero sólo puede incluirse en cada observación una pequeña porción del cielo. En el observatorio del Instituto Harvard se han empleado ampliamente refractores de ancho ángulo o telescopios del tipo de lente, los cuales abarcan una extensa área de los cielos en cada fotografía, pero en una escala necesariamente menor que la que es posible abarcar con los grandes telescopios reflectores.

En el Observatorio del Monte Wilson se ha concedido gran importancia y seguridad a las observaciones fragmentadas, o sea al uso de áreas seleccionadas del cielo. Aun cuando la selección se hace al azar, sin preferencia especial por un área o franja del firmamento, siempre se corre el peligro de que las aproximaciones y generalizaciones basadas en esas áreas seleccionadas resulten excesivamente generales, y de que se prescinda de las localizaciones en el proceso final de depuración. Como consecuencia, los observadores del Monte Wilson y los investigadores de las observaciones discrepan de los expertos de Harvard en lo relativo a los racimos de estrellas. Los astrónomos del Monte Wilson reconocen sin dificultad los racimos de galaxias que se encuentran en las constelaciones de Virgo, la Cabellera de Berenice, Bootes, la Osa Mayor, la Corona Boreal y Piscis. Pero los especialistas de Harvard alegan que, en la estruc-

tura de la metagalaxia, las irregularidades constituyen la regla más bien que la excepción. Hasta que se concilien estos dos puntos de vista, todas las conclusiones respecto a la estructura del universo visible están sujetas a reinterpretaciones. Pero la nueva labor sólo será cuantitativamente distinta de la que se ha realizado hasta ahora y volverán a revelarse las tendencias principales. En grandes volúmenes del universo, los agrupamientos irregulares a que se refieren los astrónomos de Harvard se descomponen en una distribución toscamente uniforme tal como la que alegan los observadores de la costa del Pacífico.

En la segunda década del presente siglo, el Observatorio Lowell, de Flagstaff, Arizona, hizo observaciones espectrográficas de varias galaxias en espiral para determinar sus velocidades visibles por medio del efecto Doppler-Fizeau, es decir, comparando los desplazamientos observados en las líneas de los espectros de las galaxias con las posiciones de las líneas observadas en el laboratorio. Casi sin excepción las líneas de los espectros de las galaxias aparecieron desplazadas hacia el rojo en proporciones que superaban los desplazamientos observados anteriormente en cualquier otro tipo de objeto. Este desplazamiento hacia el rojo fué interpretado con considerable éxito como un movimiento de retroceso, y las únicas galaxias que no lo presentaban eran las más grandes y presumiblemente las más cercanas. Las otras presentaban desplazamientos vagamente relacionados con su brillantez aparente.

Hoy sabemos que las velocidades de acceso a las galaxias más cercanas son sólo aparentes y causadas por la rotación de nuestra propia galaxia. Nos vemos llevados hacia ellas por la rotación galáctica del orden de 150 millas por segundo que anula sus propios movimientos. La interpretación de la recesión aparente en cuanto a las otras —el efecto de la expansión del universo— es uno de los más importantes problemas de la astronomía y la física.

La primera tentativa de explicación fué hecha por Harlow Shapley, quien se refirió al principio de equidistribución de la energía. Los estudios de las velocidades estelares habían revelado que, por lo que se refiere a gran número de estrellas, las de mayor masa, por regla general, viajaban más despacio. Por ello, Shapley dijo que la correlación entre velocidad y debilidad de luz en las galaxias podría ser en realidad una correlación entre velocidad y masa, y que las galaxias más débiles eran probablemente las de menor masa. Tal suposición se basaba en la hipótesis tácita de que todas las galaxias se encontraban aproximadamente a la misma dis-

tancias de nosotros, como creían en aquellos días tantos investigadores del problema. Shapley añadió, sin embargo, que la correlación podría ser entre velocidad y distancia. Hoy día hemos pasado a admitir este último punto de vista y creemos que las galaxias, dentro de una amplia aproximación, pertenecen al mismo orden de masa.

El problema de determinar la brillantez aparente y los diámetros aparentes o angulares de las galaxias entraña no pocas dificultades. Una galaxia es relativamente densa por el centro, adelgazándose por los bordes, fenómeno que es más marcado en unas que en otras. La falta de alta densidad de población en los márgenes reduce la cantidad de luz por área de unidad en la superficie del firmamento, de modo que las porciones marginales de una galaxia no aparecen fuertemente impresionadas en la placa fotográfica. Tratándose de una galaxia próxima, este efecto no tiene gran importancia porque son muchas las estrellas de suficiente brillantez que pueden revelarse a la emulsión sensitiva. En cuanto a las galaxias distantes, la densidad luminosa en los bordes es tan baja que ni siquiera puede franquear el umbral de intensidad de la emulsión sensitiva y no es posible construir ninguna imagen. En otras palabras, mientras que, por lo común, al prolongar la exposición se obtiene una imagen cada vez más fuerte en la emulsión, cuando la luz incidente está muy por debajo de la intensidad requerida para superar la inercia de la emulsión, por mucho que se prolongue la exposición no se obtiene una imagen más fuerte. Las galaxias más distantes que hoy pueden fotografiarse se presentan como manchas ligeramente vellosas que apenas pueden distinguirse de las estrellas. En realidad, estas manchas sólo son imágenes de los núcleos y no de los brazos exteriores de la espiral.

Aun cuando las porciones exteriores de una galaxia son registradas en la fotografía, el ojo humano sólo puede distinguirlas cuando el oscurecimiento en el negativo ha alcanzado cierto valor de limitación. Existen métodos instrumentales para percibir grados de oscurecimiento en el negativo que escaparían por completo a la observación del ojo humano. Tales son los métodos que se emplean en diversas formas del microfotómetro. Para ello, se hace pasar un haz de luz a través del negativo y su intensidad es registrada al ser recibida por una célula fotoeléctrica u otro instrumento impersonal. El microfotómetro puede percibir diferencias de intensidad mucho más pequeñas que la menor que pueda observar el ojo humano, y por medio de tales instrumentos se ha demostrado que las dimensiones de todas las imágenes de las galaxias superan

considerablemente los cálculos hechos anteriormente por el ojo humano. No es nada raro que el microfotómetro registre el diámetro de una espiral con un tamaño por lo menos cinco veces mayor que el calculado por un observador cuidadoso al examinar la misma fotografía sirviéndose solamente de sus ojos. Los bordes emplumados de las imágenes de las galaxias no se registran completamente, debido a consideraciones relativas a las emulsiones empleadas; pero sólo el microfotómetro puede empezar a decidir la cantidad que ha sido realmente registrada.

Las espirales más próximas son aproximadamente del mismo orden de tamaño que la nuestra, de acuerdo con medidas más o menos directas, complementando el examen ordinario con el estudio microfotométrico. Las que se encuentran cerca de la distancia media parecen ser sólo ligeramente más pequeñas cuando se estudian cuidadosamente. Por lo que sabemos de las deficiencias del método fotográfico, debemos reconocer que, en cuanto a las galaxias más distantes, no hemos logrado registrar toda la luz y que no nos es posible registrar nada de la luz procedente de los márgenes exteriores.

Todos los estudios relativos a la brillantez y dimensiones de las galaxias distantes contienen inexactitudes inherentes de esta especie, y la medida de la brillantez o el tamaño aparente así registrado está sujeta a revisión. Es evidente para todos que tal revisión debe hacerse, aunque el carácter de la misma está sujeto a discusión. Otra deficiencia importante en nuestras observaciones es motivada por el hecho de que las placas fotográficas utilizadas para los estudios son sensibles a regiones limitadas del espectro, particularmente, al verde, azul y violeta. Esto tiene importancia porque aquí tenemos que habérnoslas con los desplazamientos Doppler-Fizeau de las líneas del espectro, o, cuando menos, un desplazamiento hacia el rojo que es proporcional, en cada línea, a la longitud de onda de la misma.

Cuando Doppler explicó por primera vez la intensidad variable de una fuente de sonido, dando así su nombre al efecto Doppler, trató de extender la idea a los fenómenos de la luz. Sugirió que las estrellas rojas eran las que se apartaban de nosotros, mientras que las azules eran las que se acercaban. Sin embargo, las velocidades razonables de las estrellas no permitirían una gran modificación, porque un desplazamiento hacia el rojo empujaría un ultravioleta algo más invisible al violeta visible, mientras que un desplazamiento al violeta empujaría un infrarrojo algo más invisible al rojo visible. Fizeau declaró que los desplazamientos de las líneas del espectro,

según se deducía de las investigaciones de laboratorio, permitirían percibir y evaluar las velocidades estelares, que, a la larga fueron descubiertas. Sin embargo, las velocidades estelares son demasiado pequeñas para producir cambios de color.

La distribución de la energía a través de todas las longitudes de onda emitidas por una estrella no es en modo alguno uniforme. La intensidad máxima es determinada por la temperatura de la estrella, de acuerdo con lo que se conoce como la ley de desplazamiento de Wien. Aproximadamente, la longitud de onda, en unidades angstrom, del lugar de intensidad máxima en el espectro de una estrella se obtiene dividiendo la constante 28.800,000 por la temperatura de la estrella en grados centígrados, contando desde el cero absoluto. Por ejemplo, una estrella cuya temperatura efectiva es 2,880 grados absolutos, presentará un espectro con intensidad máxima de 10,000 angstroms en el infrarrojo. Una estrella con el doble de temperatura efectiva tendrá su intensidad máxima en el verde, a 5,000 angstroms. En una fotografía del espectro, el máximo aparente será alterado de acuerdo con la reflexibilidad de los espejos del telescopio, o la falta de transmisión uniforme de las lentes, la transmisión espectral del prisma del espectrógrafo y la curva de sensibilidad de la emulsión fotográfica empleada. Mediante ciertos tipos de estandarización de la placa fotográfica, estos efectos pueden eliminarse en gran parte, especialmente si se estudia una luz estandar a través de la totalidad del sistema óptico, de una vez por todas.

Una galaxia es un conglomerado de estrellas. Estas están en movimiento, debido a lo cual sus espectros individuales, al ser observados por separado, revelarían efectos Doppler-Fizeau. Por esta razón y a causa de los pequeños movimientos de las numerosas estrellas de una galaxia, las líneas del espectro de la misma no son afinadas, ya que están compuestas de las líneas idénticas de los espectros de muchas estrellas, desplazadas todas en diferente cuantía. En general, la curva de intensidad de una galaxia está compuesta por las curvas de todas sus estrellas. Sin embargo, hay tipos predominantes de estrellas, y las galaxias muestran casi uniformemente colores y curvas que se asemejan a los de las estrellas del mismo tipo, como el sol, una estrella con una temperatura efectiva de aproximadamente 6,000 grados absolutos y una intensidad máxima de unos 4,750 angstroms.

Las velocidades indicadas por los desplazamientos Doppler-Fizeau en cuanto a las estrellas son del orden de sólo unas cuantas docenas de millas por segundo, en el mejor de los casos. En cuanto

a las galaxias, el desplazamiento máximo medido corresponde a una velocidad de unas 25,000 millas por segundo. El desplazamiento es revelado por los desplazamientos de las líneas del espectro; pero el fondo del espectro en su totalidad es desplazado también, y un desplazamiento de esta cuantía moverá la longitud de onda de intensidad máxima desde 4,750 angstroms en el azul-violeta hasta 5,400 angstroms en el verde. En otras palabras, el color de una galaxia debe ser seriamente alterado por este desplazamiento, y todas las medidas de brillantez aparente hechas con anterioridad sobre placas fotográficas que no registran la luz de todas las longitudes de onda están sujetas a cuidadosa corrección de acuerdo con los desplazamientos de las líneas del espectro.

Sea la que fuere la causa de los desplazamientos de las líneas, la cuantía del desplazamiento puede utilizarse como indicación de la corrección que es necesario hacer; pero la cuantía de la corrección será diferente, para un desplazamiento dado, tratándose de una causa diferente del mismo. Este punto resultará de importancia al hacer el resumen del problema de las galaxias.

En los observatorios Lick y Monte Wilson se han hecho estudios profundos de regiones seleccionadas del firmamento con telescopios de reflexión que varían de 36 a 100 pulgadas de diámetro, siendo los más grandes los del Monte Wilson. En las estaciones del observatorio del Instituto Harvard de Oak Ridge (Massachusetts), Arequipa (Perú) y Bloemfontein (Africa del Sur), se han hecho estudios no tan profundos de cada grado cuadrado del firmamento. Todavía falta dar la interpretación completa de las diferencias de distribución en las diversas áreas, según las han registrado los observadores de Harvard; pero en varias regiones son evidentes los racimos de estrellas, en particular en las que han sido investigadas con bastante precisión en Monte Wilson. Se han hecho estudios estadísticos de dimensiones y brillantez aparente en relación con los desplazamientos de las líneas del espectro, especialmente por Hubble en Monte Wilson, y partiendo de estos estudios se plantean la mayoría de los problemas. La importante labor de exploración realizada por V. M. Slipher en Lowell midiendo los desplazamientos del rojo ha sido continuada en Monte Wilson gracias, en gran parte, a los esfuerzos de Milton Humason.

Cuanto mayor es el desplazamiento del rojo, a más distancia se encuentra la galaxia. Como primera aproximación, el desplazamiento del rojo es proporcional a la distancia, tal como se deriva de la medida del tamaño o de la brillantez aparente. Supongamos que contamos las galaxias hasta una que limita la brillantez y que

luego las contamos hasta llegar a una brillantez aparente que sólo representa una cuarta parte del límite anterior. Esto debe significar que se ha incluído ahora una esfera que representa el doble del radio, y por consiguiente en el segundo recuento deben quedar incluídas ocho veces más galaxias que en el primero. Por supuesto, el segundo recuento comprende todas las galaxias del primero.

Cuando se hacen estos recuentos cada vez más minuciosos, se descubre que no se ha obtenido la proporción adecuada. Al pasar a una galaxia cuya distancia es el doble de la de otra, a juzgar por su brillantez aparente, no incluímos en la segunda esfera ocho veces tantas galaxias como en la primera. El factor es menos de ocho, como si las galaxias fueran adelgazando en todas direcciones a partir de nosotros.

Desde los primeros días en que la investigación revistió un carácter verdaderamente científico hemos aprendido a rehuir toda clase de universo centralizado en el observador. El mar Mediterráneo no se encuentra en realidad "en medio de la tierra", ni la tierra es el centro del universo. El sol no es sino una de las muchísimas estrellas y no se encuentra en el centro de la galaxia de la que forma parte. Nuestra propia galaxia parece no ser sino uno de muchos millones de conglomerados estelares análogos. Debemos evitar, dentro de lo posible, la aceptación de un universo aparente cuyo centro se encuentra en nuestra vecindad, dentro del espacio. Concretamente, debemos hallar, tras concienzudos estudios, la manera de evitar la aceptación de los recuentos de las galaxias tal como han llegado hasta nosotros cuando indican una disminución del número de estrellas a medida que llegamos a mayores distancias en todas las direcciones.

Se ha mencionado ya la necesidad de rectificar la brillantez observada de las galaxias. La existencia de un desplazamiento del rojo que varía con la brillantez aparente requiere una corrección, cualquiera que sea su causa. Un desplazamiento hacia el rojo es un desplazamiento hacia longitudes de onda más largas o hacia frecuencias más bajas. Las frecuencias más bajas significan energías más bajas y por lo tanto deben ser rectificadas las energías observadas. Si se trata de una simple pérdida de energía, por una causa desconocida, se requiere una clase de corrección, y si se trata de una pérdida de energía debida a la dilución de los quanta, a medida que las galaxias se alejan corporalmente de nosotros, la corrección es de otro género.

Sin adentrarnos en los detalles matemáticos y físicos del problema, puede decirse aquí que cuando se aplica la rectificación re-

querida por los desplazamientos hacia el rojo, según se interpretan con el efecto Doppler-Fizeau, las galaxias distantes adquieren una brillantez excesiva. Se tiene entonces la impresión de que las galaxias aumentan en número a medida que llegamos a mayores distancias, como si viviéramos en la región menos poblada de un universo que resulta cada vez más poblada a medida que llegamos a distancias cada vez más grandes. Recaemos así en un universo centralizado en nosotros, lo cual no debe satisfacernos.

Hay una manera de evitar la apariencia y consiste en la aceptación de un tipo de universo que trasciende la percepción. De la misma manera que la superficie de la tierra es bidimensional, curvada en una tercera dimensión, así también nuestro universo puede ser tridimensional, curvado en una cuarta dimensión. La uniformidad de distribución de las galaxias podría restablecerse mediante la adecuada elección del radio del universo cuatridimensional. Sin detenernos en esta posibilidad, que será estudiada en detalle en el siguiente trabajo, permítaseme decir aquí que, sobre la base de las observaciones de 100.000,000 de galaxias a distancia de 500.000,000 de años-luz en todas las direcciones, el radio del universo es tal que la población total sólo asciende a 400.000,000, y que en el telescopio de 200 pulgadas revelará todas las del universo, puesto que tiene un alcance de ocho veces el volumen comprendido en los estudios más profundos del telescopio de 100 pulgadas.

Cuando se hacen las rectificaciones de la brillantez aparente solamente como un medio de restablecer la pérdida de energía revelada por los desplazamientos hacia el rojo, se obtiene una distribución uniforme de las galaxias, incluyendo los estudios más profundos. Esto resulta satisfactorio porque entonces no se advierte preferencia por ninguna región del espacio y no miramos a un universo al que el hombre sirve de centro. Ello da origen a la posible aceptación de un nuevo principio de la naturaleza: el de la fatiga de la luz. La luz pierde energía por el acto mismo de viajar, y la pérdida es proporcional a la distancia recorrida. Sea como fuere, la idea es razonable, aunque no hay nada en la teoría actual de la luz que permita o incluso sugiera la existencia de esa pérdida. Claro está que nuestras teorías físicas están en gran parte ligadas a la tierra, y cuando empezamos a atravesar muchos millones de años-luz cabe esperar que hemos de tropezarnos con alguna que otra sorpresa. En vista del anacronismo introducido cuando interpretamos los desplazamientos del rojo como debidos al efecto Doppler-Fizeau, puede que la alternativa más simple sea incluir

en nuestra teoría de la luz una pérdida de energía, una fatiga de la luz, insospechadas hasta ahora.

Es probable que se llegue al meollo de este asunto, en el aspecto de la observación, dentro de los próximos años, cuando el telescopio de 200 pulgadas haya superado la labor del de 100 pulgadas. Cuando se disponga de observaciones homogéneas realizadas con este nuevo instrumento, será posible llegar a una decisión.

LEOPOLD INFELD [1]

SOBRE LA ESTRUCTURA DE NUESTRO UNIVERSO

La ciencia de nuestro universo es nueva. Podemos decir el año en que nació: el de 1917, cuando apareció el trabajo de Einstein "Consideraciones cosmológicas en la teoría general de la relatividad".

En las diferentes religiones, en la poesía, el arte y la filosofía, encontramos creencias, descripciones y especulaciones acerca del universo en el que viven los hombres. Todas estas tentativas por penetrar en lo desconocido sirviéndose de la fe o de la imaginación son tan viejas como la historia de nuestra civilización. Pero hasta hace unos treinta años no se trasladó este antiguo problema al campo de la ciencia. Ahí continuará durante largo tiempo en lo sucesivo.

Resumiendo el resultado de tres décadas de investigaciones experimentales y teóricas, permítasenos decir: *Nuestro universo es un universo de islas.* Está formado por islas de materia (o nebulosas) sobre el mar del vacío.

Imagínese que viajamos a través del espacio con la máxima velocidad *conocida* y con la máxima velocidad *posible,* es decir, con la velocidad de la luz. En cuestión de minutos dejaremos detrás de nosotros al sol; en cuestión de horas saldremos de todo nuestro sistema solar y en cuestión de años llegaremos a las estrellas más cercanas. Así, ahora juzgamos las distancias por años-luz: los años que necesitaríamos para atravesar estas distancias viajando con la velocidad de la luz.

[1] Leopold Infeld ha sido catedrático auxiliar de la Universidad de Lwow, en 1929-1934; miembro correspondiente de la Fundación Rockefeller, en Cambridge (Inglaterra), en 1934-1935, y profesor de matemáticas aplicadas en la Universidad de Toronto desde 1939. Es autor de *The World in Modern Science* (1934), *The Evolution of Physics* (en colaboración con Albert Einstein, 1938), *Quest: The Evolution of a Scientist* (1941, obra que obtuvo el Premio Anisfield-Wolf), *Whon the Gods Love: The Story of Evariste Galois* (1948), y ha publicado alrededor de cincuenta trabajos sobre física teórica, algunos de ellos en colaboración con Born y Einstein. *(N. del editor.)*

Nuestro sistema solar y todas las estrellas que vemos en una noche refulgente constituyen *nuestra* vecindad más cercana; forman parte de *nuestra* galaxia, de *nuestra* nebulosa, forman parte de la isla en que vivimos. Pero esta galaxia (de la que son miembros el sol, los planetas, las estrellas perceptibles a simple vista) sólo es una de las muchísimas islas, una de las muchísimas *nebulosas* de nuestro universo. Las nebulosas —los grandes conglomerados de estrellas— son islas de materia en un mar de espacio vacío. Nuestra galaxia sólo es una de ellas. Después de miles de años de viajar con la velocidad de la luz nos encontraríamos fuera de nuestra galaxia. Luego, para llegar a la isla más próxima, al conglomerado de estrellas más cercano, tendríamos que viajar casi un millón de años-luz más. No hay en todo esto nada de fantástico ni tampoco hay motivo para impresionarse por la extensión del vacío y la rareza de la materia en nuestro universo. Incluso hay menos motivo para sorprenderse de este hecho que respecto a la escasez de estaciones de gasolina en una carretera del desierto porque nunca viajaremos a lo largo de estas carreteras del universo. Los rayos de luz que llegan a nuestros ojos desde las lejanas nebulosas son los únicos mensajeros que viajan y a ellos les tiene sin cuidado el vacío. Antes al contrario, no podrían llegar a nuestra tierra si en su largo viaje tropezaran con una cantidad excesiva de materia absorbente.

Examinemos los testimonios que nos aportan estos mensajeros luminosos y que son sorprendidos por nuestros más potentes reflectores. Se han fotografiado centenares de miles de estas islas nebulosas. Las más lejanas de nosotros que son visibles, aunque muy débilmente, se encuentran aproximadamente a quinientos millones de años-luz. Tal es la mayor distancia hasta la que podemos llegar hoy. Construyendo mejores reflectores (como el de 200 pulgadas que se ha concluído recientemente) nos será posible profundizar todavía más en el espacio.

El promedio de las nebulosas es de unos 20,000 años-luz de diámetro, y la distancia entre las nebulosas es, por término medio, de unos dos millones de años-luz. Lo repito: islas en el mar del vacío.

El astrónomo Edwin Hubble hace la pintoresca comparación siguiente: imaginémonos pelotas de tenis separadas por una distancia de cincuenta pies y diseminadas a través de una esfera de cinco millas de diámetro. Cada pelota de tenis equivale a una nebulosa formada por muchos millones de estrellas. Cinco millas representan la distancia hasta la que podemos llegar hoy. Los cincuenta pies entre las pelotas de tenis representan la rareza de la materia y lo común que es en nuestro universo el espacio vacío.

Tal es la estructura del universo según la revela la observación y la simple interpretación teórica de los resultados de ésta.

A nosotros nos interesa la estructura de nuestro universo *como un todo,* es decir, en sus amplias características, en sus promedios, prescindiendo de las pequeñas irregularidades y de las desviaciones que cosmológicamente carecen de importancia. De análoga manera, cuando planeamos un viaje en aeroplano alrededor de la tierra, nos interesa la distribución de los campos de aterrizaje y muy poco los pueblecitos que se encuentran entre ellos. A tal fin, consideramos la tierra como una esfera con puntos que representan los aeródromos. Pero en otras ocasiones, cuando atendemos a los asuntos de nuestra vida cotidiana, debemos preocuparnos y nos preocupamos de nuestros vecinos y de lo que acontece en nuestra vecindad.

Al contemplar el universo como un todo nos interesan poco las pequeñas irregularidades, el hecho de que cada isla, de que cada nebulosa, tiene su forma peculiar, su tamaño, su edad, su historia. Consideramos las islas como si todas ellas fueran iguales y prescindimos de las diferencias en sus tamaños y en las distancias que las separan a unas de otras. Nuestra imagen de nebulosas *equidistantes* y de *tamaños iguales* es una imagen sumamente idealizada. En este caso, como ocurre siempre en la ciencia, simplificamos e idealizamos. Después, complicamos nuestra simple imagen original bajo el influjo de nuevas observaciones. Al cabo de algún tiempo, las crecientes complicaciones hacen que la totalidad de la imagen resulte tan horrenda en su complejidad que es menester rechazarla y buscar una nueva imagen más simple. Pero en la ciencia de la cosmología, todavía joven, no hemos progresado mucho más allá de los primeros pasos. Nuestra imagen es todavía muy simple, quizás demasiado.

Ahora llegamos al rasgo más característico y desconcertante de nuestro universo de islas. Este rasgo nos ha sido revelado también por la observación. Expondré primero el resultado en lenguaje técnico: *los espectros de las nebulosas muestran un desplazamiento hacia el rojo.* O para decirlo en lenguaje menos científico: *las nebulosas parecen huir de nosotros.*

La explicación de ambas enunciaciones equivalentes sólo puede darse en términos de física. El pitido de una locomotora le parece al observador que se encuentra en la estación más agudo a medida que la máquina se acerca que cuando está parada, y, en cambio, parece más bajo cuando la locomotora se aleja de la estación. Este hecho, bien conocido en acústica, se llama el efecto Doppler.

Un fenómeno un tanto similar encontramos en la vida ordinaria. Imaginaos a un grupo de excursionistas que viajan en automóvil y

que cada hora os envía mensajes en motocicleta. Los mensajeros llegarán cada hora mientras el grupo descansa en un albergue de turistas. Pero si el automóvil sigue alejandose de vosotros, recibiréis los mensajeros con intervalos más largos de una hora. Si el automóvil viaja hacia vosotros, los recibiréis con intervalos más cortos. En realidad, tomando como base la frecuencia de la llegada de los mensajeros, podréis deducir la velocidad a la que el automóvil se aleja o se aproxima, conociendo la velocidad de la motocicleta y la frecuencia con la que son enviados los mensajes. Lo mismo puede decirse en el caso del pitido de la locomotora. Su intensidad mide la frecuencia con la que llegan los mensajeros acústicos: es más alta (es decir, la frecuencia es más alta) si la locomotora se acerca a la estación, y más baja cuando se aleja.

Un efecto muy parecido, también conocidísimo del físico, es el efecto Doppler en el campo de la óptica.

El espectroscopio es un aparato que analiza la luz. Por ejemplo, si la fuente de luz es un gas a través del cual pasa una corriente eléctrica (como, pongamos por caso, tratándose de un tubo de neón) lo que vemos entonces, mirando a la fuente a través de una espectroscopio, son finas franjas brillantes sobre un fondo oscuro. Los vapores de diferentes elementos dan diferentes sistemas de líneas. No existen dos elementos con idénticos sistemas de líneas, de la misma manera que no hay dos hombres con huellas digitales idénticas. Por ello, el sistema de líneas caracteriza de modo excepcional el elemento al que pertenece, y todo elemento es caracterizado por su sistema de líneas.

Analizando la luz procedente de las estrellas o las nebulosas podemos descubrir la presencia de elementos que conocemos y hemos analizado en la tierra. Las líneas del hidrógeno o del helio tienen la misma estructura sea que procedan de nuestra tierra, del sol, de las estrellas de nuestra galaxia o de las nebulosas.

Con todo, si comparamos el espectro de un elemento de nuestra tierra con el del mismo elemento de una nebulosa, no sólo vemos la misma estructura (de lo contrario no podríamos decir que se trata del mismo elemento), sino que reconocemos también algunas diferencias. La totalidad del espectro —es decir, *todas* las líneas que caracterizan el elemento— aparece ligeramente desplazado. El fenómeno, según sabemos tanto por la teoría como por el experimento, debe producirse y se produce si la fuente de luz (tubo de neón, estrella, nebulosa) se aleja de nosotros o se acerca. Es el mismo efecto —el efecto Doppler— que hemos reconocido en el ejemplo de los mensajeros o en el del pitido de la locomotora: el sistema de línea se

desplaza hacia el extremo rojo del espectro si la fuente de luz se aleja del observador y hacia el extremo violeta si se acerca a él. El desplazamiento hacia el extremo rojo indica una frecuencia disminuída de los mensajeros luminosos, y el desplazamiento hacia el extremo violeta, una frecuencia aumentada. Como en el caso del pitido de la locomotora y de los motociclistas, podríamos calcular, tomando como base ese desplazamiento hacia el rojo o el violeta, la velocidad con la que la fuente de luz se aleja de nosotros o viene en nuestra dirección.

La cuestión que se plantea es la siguiente: ¿Por qué se comportan las nebulosas como si huyeran de nuestra galaxia? La respuesta más simple sería que las nebulosas se conducen como si huyeran de nosotros porque se alejan de nuestra galaxia. Pero en tal caso el problema es este: ¿Por qué se alejan?

Si el desplazamiento hacia el rojo y el alejamiento de las nebulosas hubieran sido descubiertos en los tiempos bíblicos, puede que ahora tuviéramos alguna explicación que resultara satisfactoria. (No se me escapa el caracter disparatado de esta observación). Podríamos haber supuesto que en cada galaxia hay sistemas planetarios y que nuestra tierra no es el único planeta poblado por seres "inteligentes". Sin embargo, nuestro planeta es aquel en el que pecó Adan y el único en el que los hombres matan a los hombres. Por lo tanto, todas las demás nebulosas sienten una profunda antipatía por nuestra galaxia y tratan de alejarse de nosotros todo lo posible.

No obstante, difícilmente puede satisfacernos semejante explicación. Aun en el caso de que los habitantes de otras nebulosas pudieran ver lo que aquí ocurre, varían *ahora* lo que acontecía hace millones de años, porque la luz de nuestra tierra tarda millones de años en llegar hasta ellos. En segundo lugar, existe otro punto curioso, muy curioso en verdad. El desplazamiento hacia el rojo *aumenta* con la distancia. Eso significa que cuanto mayor es la distancia que las separa de nuestra galaxia, mayor parece ser la velocidad de las nebulosas que se alejan. ¡Esto es desconcertante! ¿Por qué ha de aumentar la aversión con la distancia? La ley de este incremento del desplazamiento hacia el rojo es, en sí, sumamente simple: cuanto mayor es la distancia, mayor es —proporcionalmente— el desplazamiento hacia el rojo. Una nebulosa situada a cien millones de años-luz de distancia parece alejarse de nosotros diez veces más rápidamente que una nebulosa situada a diez millones de años-luz. Esta ley que relaciona el desplazamiento hacia el rojo con la distancia parece ser bastante exacta, con pequeñas desviaciones sistemáticas, a pesar de las

cuales es lo suficiente buena hasta para permitirnos determinar las distancias de las nebulosas más lejanas.

Volvamos a nuestra pregunta: ¿Cuál es la razón de la ley del desplazamiento hacia el rojo?

En busca de una respuesta, abandonamos la región de la observación y entramos en la de la especulación: la de la teoría general de la relatividad. Existe un puente que conduce a esta región: un principio importante que pertenece en parte al campo de la observación y en parte al de la especulación.

Si enfocamos nuestros telescopios reflectores en diferentes direcciones, vemos que, desde el punto de vista estadístico, ninguna dirección se diferencia considerablemente de las otras. Por regla general, encontramos tantas nebulosas en una dirección como en cualquier otra. Tampoco vemos que el número de nebulosas por volumen de unidad cambie con la profundidad hasta la que penetren nuestros reflectores. El universo parece hallarse uniformemente lleno de materia. Claro está que hay algunas irregularidades, pero son lo bastante pequeñas para que podamos suponer, con cierta aproximación, que no existe gran diferencia entre las direcciones o puntos del espacio.

Así llegamos a la conclusión de que el universo es *uniforme*. Tal vez nos hayamos precipitado demasiado al sacar esa conclusión. Sólo conocemos un fragmento del universo y el nuevo y más grande telescopio reflector acaso revele otras irregularidades y algunas desviaciones sistemáticas de la uniformidad. Con todo, si el universo no es uniforme, tendremos que saber cómo cambia de dirección y de profundidad. Evidentemente, decir que el universo es uniforme es formular la hipótesis más simple posible, y al hacer esa hipótesis fundamental no contradecimos la experiencia.

La suposición, basada esencialmente en la observación, ha sido recogida y perfilada por la teoría llegando a convertirse, por así decir, en un mandamiento moral para nuestro universo. Nosotros afirmamos: la historia del universo, considerado en su conjunto, debe ser la misma, escríbase desde nuestra galaxia o desde cualquier otra nebulosa. Imaginémonos, ya que no se ha puesto límite alguno a nuestra imaginación, que enviamos a cada nebulosa un observador debidamente provisto de cerebro y de instrumentos. La historia del universo será la misma para cada uno de estos observadores. Esto es lo que entendemos por el principio de uniformidad. Habrá, por supuesto, pequeñas irregularidades; pero en las descripciones científicas de todos estos sabios situados en diferentes globos de las diferentes nebulosas se reflejará de la misma manera un universo suavizado e idealizado.

Ahora tenemos un principio poderoso que restringe las posibilidades en la estructura del universo: ¡el modelo del universo debe coincidir con el principio de uniformidad!

Volvemos a la cuestión precedente: ¿cómo explicamos el desplazamiento hacia el rojo? Ahora la cuestión se vuelve más general y más difícil. Bajo el principio de uniformidad, el observador situado en una nebulosa fuera de nuestra galaxia advierte el desplazamiento hacia el rojo: ¡las nebulosas parecen alejarse también de él! Así, pues, no se alejan solamente de nuestra galaxia, sino que huyen una de otra: ¡insociables criaturas, llenas de mutua aversión!

Pero incluso esta conclusión es ligeramente prematura. Suponer que las nebulosas se alejan unas de otras acaso no sea la única manera de explicar el desplazamiento hacia el rojo. Todo lo que suponemos en este momento es que el observador situado en cada una de estas nebulosas confirmaría la existencia del desplazamiento hacia el rojo y que descubriría que este desplazamiento es proporcional a la distancia.

De este modo, nos vemos llevados a plantear otra cuestión: ¿qué estructuras posibles de nuestro universo son consecuentes con el principio de uniformidad? Aquí, la historia de la estructura de nuestro universo se entremezcla con la historia de la teoría de la relatividad y más específicamente con la de la teoría general de la relatividad.

Por lo tanto, tenemos que interrumpir la historia de nuestro universo para decir unas cuantas palabras acerca de la geometría y de su relación con la física. Al hacerlo así, tendremos que considerar un espacio tridimensional curvo. Este es un concepto difícil, pero podemos simplificarlo hablando solamente acerca de superficies bidimensionales curvas y explicando, con ayuda de ellas, por lo menos algunas de las ideas esenciales de la cosmología moderna.

Nos imaginamos criaturas pensantes que viven en un plano bidimensional. Podemos contemplarlas y hasta sentirnos conmovidos por sus acciones como sabe todo aquel que ha derramado lágrimas presenciando una película. Pero no debemos tomar demasiado en serio la comparación cinematográfica. Nos imaginamos la pantalla infinitamente grande, olvidamos la perspectiva y visualizamos criaturas planas con sólo un perfil como las de una pintura egipcia. Suponemos también que estas criaturas tienen cerebro y actúan por propio acuerdo. Para ellas, el plano bidimensional representa lo que es para nosotros el espacio tridimensional. Si son inteligentes, pueden desarrollar con el tiempo el conocimiento de la geometría euclidiana del plano, la geometría que nosotros aprendimos en la escuela superior. Una vez que inician un viaje a lo largo de una línea recta nunca volverán a su punto

de partida; dos líneas paralelas no se encuentran jamás, y la circunferencia de un círculo será πr^2. Estas criaturas —podemos imaginar— tienen incluso una especie de física primitiva. Puede que hayan hecho experimentos con los rayos de luz, desarrollando el concepto de tiempo y velocidad y descubriendo que la velocidad de la luz —como en nuestro espacio tridimensional— es de 186,000 millas por segundo.

Pasemos ahora al segundo capítulo en nuestra historia de las criaturas bidimensionales. En algún momento, cuando todas estas criaturas estaban dormidas, alguien las ha trasplantado a la superficie de una esfera, una esfera tan grande que, al principio al menos, no advierten ningún cambio. Sus comunicaciones no están lo bastante desarrolladas para descubrir que un viaje comenzado "hacia adelante" concluirá en último término en el punto de partida. Al trazar un pequeño círculo, no advertirán que su circunferencia es ligeramente menor que πr^2. Pero a medida que se suceden las generaciones de criaturas bidimensionales, a medida que va perfeccionándose su ciencia y su técnica, descubrirán que hay algo erróneo en su herencia de la geometría euclidiana. ¡Llegarán a la conclusión de que es más conveniente y está más en consonancia con sus observaciones utilizar la geometría no euclidiana de una esfera! Durante algún tiempo, los elementos conservadores de la comunidad se resistirán a semejante innovación y acaso quemen en una hoguera bidimensional a las criaturas que prediquen la geometría no euclidiana. Los conservadores puede que digan que las varillas utilizadas no eran perfectamente rígidas, que algunas diferencias de temperatura explicaban el aparente fracaso de la geometría euclidiana. Pero la ciencia obtendrá finalmente la victoria en esa lucha, como la obtiene siempre. Poco a poco, los habitantes bidimensionales de la esfera reconocerán que es mucho más conveniente suponer que su geometría es la de una esfera. Así aprenderán que una "línea recta" (un gran círculo para nosotros) está siempre cerrada, que un rayo de luz enviado desde cualquier punto P vuelve al punto de partida. Afirmarán que esto es verdad aun cuando no puedan viajar alrededor de toda la esfera, aun cuando hayan de nacer y morir cien generaciones antes de que un experimento real demuestre que un rayo de luz vuelve a su punto de partida. Deducirán estos resultados del hecho de que en su vecindad, la geometría de carácter no euclidiano describe sus fenómenos mejor y más económicamente que la antigua geometría euclidiana. ¡Entre estas criaturas bidimensionales habrá tenido lugar una revolución científica!

La historia no es tan fantástica como parece. En efecto, algunos de sus rasgos nos recuerdan nuestra tierra y la forma en que llegó a reconocerse su forma esférica.

Volvemos ahora al tercero y último capítulo de nuestra historia de las criaturas bidimensionales. Ha tenido lugar un nuevo cambio. Algo ha vuelto a sucederles súbitamente mientras estaban dormidos; pero este acontecimiento ha sobrevenido en el campo de la física y no en el de la geometría (si es que puede establecerse una clara distinción entre geometría y física. Imaginaos a estas criaturas viviendo sobre la esfera, en la que se destacan dos puntos opuestos llamados el polo Norte y el polo Sur. La temperatura de la esfera, que ha sido uniforme, experimenta un cambio repentino. Es fría en los polos, más caliente al alejarse de ellos y ofrece el máximo calor en el ecuador. En los polos, la temperatura es el cero absoluto. Esto significa, suponemos nosotros, que las dimensiones de todas las criaturas vivas, de todas las varillas rígidas, se encogen hasta quedar reducidas a nada a medida que se aproximan a los polos. Así, las criaturas que viajan hacia los polos se vuelven cada vez más pequeñas, lo mismo que sus dimensiones y sus pasos, y aunque pueden viajar a lo largo del ecuador o de cualquier otro círculo de latitud, nunca llegarán a los polos. Viajando a lo largo de los círculos de latitud, pueden descubrir, si se ajustan debidamente las temperaturas, que cada uno de esos círculos es tan largo como el ecuador, porque sus varillas y sus propias dimensiones se han encogido de modo que pueden expresar exactamente este mismo hecho: los círculos se vuelven más pequeños, pero lo mismo les ocurre a sus varillas de medición.

Así, pues, nuestras criaturas bidimensionales inteligentes se encuentran frente a una situación completamente nueva y disponen de dos procedimientos para ajustar su existencia a su mundo modificado. Si sus cuerpos bidimensionales no son sensibles al cambio de temperatura, pueden suponer que ahora viven, no sobre un plano ni en una esfera, sino sobre un cilindro infinito. Será infinito para ellos porque nunca pueden llegar al fin viajando hacia el norte o hacia el sur; pero será finito si viajan a lo largo de los círculos paralelos, y todos los círculos tienen para ellos los mismos rasgos porque no saben nada del cambio de escala que nosotros hemos advertido contemplando su esfera con las ventajas de seres humanos tridimensionales.

En cambio, si son susceptibles al frío y al calor acaso prefieran suponer que siguen viviendo en una esfera, sobre la cual existen ahora dos puntos muy singulares a los que nunca llegarán debido a que la temperatura allí es el cero absoluto.

Nadie sabe cuál será la decisión que tomen estas criaturas. Ello depende de muchas circunstancias que no deseamos analizar. Es incluso posible que tengan dos teorías rivales y puede que empren-

dan una guerra atómica bidimensional entre estas dos filosofías del mundo.

Nuestra historia entraña una profunda moraleja: demuestra lo íntimamente que está relacionada la física con la geometría. Recuérdese que las criaturas bidimensionales tienen que elegir entre suponer, por un lado, diferencias de temperatura y una geométrica esférica, y, por otro, suponer que no existen diferencias de temperatura y admitir la geometría de un cilindro (lo cual es esencialmente una geometría euclidiana).

Nosotros, criaturas tridimensionales, nos encontramos en una situación similar. Esto es lo que nos ha enseñado la teoría general de la relatividad. Debemos tratar la geometría y la física como *un* sistema. Nuestra tarea científica consiste en formular ese sistema único que es el más consecuente y adecuado para la descripción de los fenómenos de la naturaleza. El sistema es bueno si funciona.

Después de esta digresión por el campo de la geometría, volvamos a la cosmología. Estamos buscando un modelo del universo en consonancia con el principio de uniformidad, un modelo que explique el desplazamiento hacia el rojo observado en todas las nebulosas. Aquí interviene el análisis matemático y lo único que haremos será citar y explicar algunos de los resultados.

Indudablemente, el principio de uniformidad y la ley del desplazamiento hacia el rojo restringen los modelos posibles del universo. Con todo, son posibles muchos modelos, y las pruebas derivadas de la observación no son lo bastante contundentes para permitirnos la elección de uno solo. Cualquiera que sea el carácter del universo en que vivimos, sabemos, al menos, que es una de estas dos cosas: o *abierto* o *cerrado*. Esta importante enunciación no parece excesivamente impresionante: acaso le recuerde el lector el hecho trivial de que una puerta puede estar abierta o cerrada. No obstante, el reconocimiento de esas dos posibilidades constituye un gran descubrimiento. Antes de la teoría general de la relatividad, la afirmación de que el universo está cerrado hubiera carecido de sentido. ¿Cuáles son los rasgos característicos de un universo abierto y de un universo cerrado?

Empecemos por el universo cerrado. El universo de las criaturas bidimensionales que viven sobre una esfera sería un universo cerrado. Para ellas, recordamos, un rayo de luz enviado vuelve en fin de cuentas al punto de partida.

De análoga manera, nuestro universo puede ser un universo cerrado, aunque es más difícil imaginar que describir matemáticamente un espacio esférico tridimensional. Sin embargo, podemos al menos imaginarnos en principio un experimento decisivo que nos diga si

nuestro universo es cerrado o no. Enviad un rayo de luz al espacio abierto. Si al cabo de algún tiempo el rayo de luz vuelve, entonces el universo es cerrado. Si no vuelve, el universo es abierto. Ni que decir tiene que semejante experimento entraña algunas dificultades técnicas, pero podemos hacer caso omiso de ellas. La mayor dificultad consiste en que disponemos de poco tiempo: de acuerdo con nuestros conocimientos actuales, la luz tardaría miles de millones de años en atravesar nuestro mundo y volver hasta nosotros. Con todo, existe la posibilidad de que con el nuevo reflector de 200 pulgadas podamos descubrir, dando un rodeo, si nuestro universo es abierto o cerrado.

Podemos representarnos nuestro universo como cerrado suprimiendo una dimensión y comparándolo con el universo de las criaturas bidimensionales que viven sobre una esfera. Siguiendo esta comparación, imaginemos unos puntos dorados distribuídos, con largos intervalos pero uniformemente, a través de esa esfera y que nos representarán las nebulosas de nuestro mundo. ¿Qué ocurre con el desplazamiento hacia el rojo? Al contestar a esta pregunta tenemos que complicar ligeramente nuestra imagen bidimensional. Imaginemos que una esfera se expande como un globo bajo la presión incrementada del aire. Esta esfera en expansión, más bien que una esfera de radio inmutable, es el modelo bidimensional de nuestro universo. Vemos que ese modelo satisface tanto el principio de uniformidad como la ley del desplazamiento hacia el rojo. En efecto, nuestras nebulosas —los puntos dorados sobre el globo en expansión— seguirán siendo uniformes porque fueron salpicados uniformemente y porque la expansión conserva la forma de la esfera y solamente modifica su radio. Las distancias entre las nebulosas medidas sobre el globo aumentarán. Un observador situado en cualquiera de estas nebulosas verá que las otras se alejan de él. También es evidente que muy cerca de cualquier nebulosa escogida, la velocidad de la expansión le parecerá al observador proporcional a la distancia.

Ahora examinaremos la otra posibilidad, la de un universo abierto. Aquí es innecesario suprimir una dimensión y podemos volver a la imagen tridimensional de nuestro espacio. Este universo de tipo abierto se comprende mejor desde una perspectiva histórica.

En tiempos remotos, toda la materia de nuestro universo estaba concentrada en un pequeñísimo volumen. En nuestro modelo matemático idealizado podemos decir que estaba concentrado en un punto. Así, todas las nebulosas se encontraban estrechamente comprimidas, pero luego sucedió algo y todo el mundo de la materia estalló como metralla. Las nebulosas empezaron a alejarse unas de otras con ve-

locidad constante. Vistas desde nuestra galaxia, aquellas nebulosas que tenían mayor velocidad que otras se alejaron más rápidamente. Hoy día siguen moviéndose uniformemente. Podemos ver por qué esa historia de nuestro universo nos da la ley del desplazamiento hacia el rojo (proporcional a la distancia) y satisface también el principio de uniformidad. Cuanto más alejadas están las nebulosas, mayor es su velocidad, porque esta mayor velocidad la tenían cuando fué creado el universo y la conservan porque se mueven uniformemente. Las nebulosas más cercanas a nosotros tienen menores velocidades porque las tenían ya en el momento de la creación y las han conservado. Vemos también, aunque esto es algo más difícil, que el principio de uniformidad no resulta infringido. En efecto, todas las nebulosas estaban juntas en otro tiempo, y aunque podemos decir que empezaron a alejarse de nuestra galaxia, lo mismo pueden decir los habitantes de cualquiera de las nebulosas. La más veloz de ellas tendría una velocidad cercana a la de la luz, y la totalidad de la materia del universo está concentrada dentro de una esfera, cuyo radio es igual a la velocidad de la luz c veces la época t_0 que ha transcurrido desde el momento de la creación. Cada observador puede trazar por sí mismo esa esfera, y tal enunciación será verdadera para cualquier observador. La transición de un sistema (es decir de una nebulosa) a otro se halla gobernada por la transformación formulada en la teoría especial de la relatividad. La llamada transformación Lorentz nos dice cómo describir los fenómenos de un sistema si conocemos la descripción correspondiente a otro. Consideramos, por ejemplo, nuestra galaxia como un punto O y una nebulosa muy alejada como un punto P. Entonces, P estará cerca del borde S de la esfera con el radio ct_0 trazado alrededor de O. Pero el observador situado en P se imaginará también en el centro de esa esfera. Todas las nebulosas entre P y S parecerán encontrarse sobre una cáscara contraída al ser vistas por el observador O en comparación con el observador P. Esto se debe a que se mueven rápidamente. Tal es el resultado de la famosa contracción de Lorentz, conocida de todo aquel que ha estudiado la teoría especial de la relatividad. Por la misma razón todas las nebulosas situadas más lejos de O le parecerán encontrarse sobre una cáscara contraída al observador situado en la nebulosa P. La historia de semejante universo abierto sería la misma para cualquier observador situado en cualquier nebulosa.

Sólo mediante cálculos detallados podríamos demostrar más explícitamente cómo de esa imagen se desprende tanto la ley del desplazamiento hacia el rojo como el principio de uniformidad.

¿Cuándo fué creado nuestro universo? Por la observación del actual desplazamiento hacia el rojo podemos deducir que la expansión se inició hace algunos miles de millones de años.

Ahora que conocemos, cuando menos en sus perfiles, los dos caracteres posibles de nuestro universo, podemos preguntar: ¿Es nuestro universo abierto o cerrado? Como he dicho antes, no existen suficientes pruebas para contestar la pregunta. Podemos hacer otra más modesta: ¿preferimos un universo abierto o cerrado? Esta es, por supuesto, una cuestión subjetiva y diferentes hombres de ciencia pueden ofrecer respuestas distintas. Así y todo, yo creo que la gran mayoría de los que se ocupan de problemas cosmológicos preferirían que nuestro universo fuera cerrado. En un universo cerrado hay más belleza matemática: tal universo es finito aunque no tenga límites. (La cuestión relativa a qué es lo que se encuentra más allá de una esfera tridimensional carece de sentido: no hay ningún más allá, de la misma manera que no hay ningún más allá tratándose de las criaturas bidimensionales que viven en una esfera). La superioridad matemática del universo cerrado salta a la vista si consideramos cualquier problema físico sobre ese fondo cosmológico. En el universo abierto tenemos que preocuparnos de lo que ocurre en las infinidades, porque en tal universo tenemos infinidades de tiempo y espacio. En cambio, no existen en un universo cerrado, y, para citar por un momento cuestiones técnicas, el problema, por ejemplo, de un campo electromagnético se convierte en un atractivo problema de valor de los límites, que se adapta mucho mejor al esquema general de las modernas teorías físicas que al ser tratado teniendo como fondo un universo abierto.

El presente siglo ha modificado la fisonomía de nuestro mundo. Desde los átomos hasta la estructura de nuestro universo presenciamos cambios revolucionarios, un rápido desarrollo que difícilmente puede compararse con cualquiera otro que se haya producido en la breve historia de la humanidad. Este desarrollo ha brotado, parcialmente, de las necesidades, y si volvemos la vista atrás parece determinado esencialmente por el estado anterior de la ciencia. Pero sería erróneo suponer que todo el desarrollo de la ciencia es utilitario. Nada de eso. Muchas de nuestras especulaciones acerca de los átomos y acerca de nuestro universo fueron creadas a causa de la curiosidad del hombre, debido a su deseo de penetrar cada vez más profundamente en lo desconocido. Puede ocurrir que el valor utilitario de muchas de nuestras teorías sea nulo, pero nos ayudan a comprender el mundo en que vivimos.

Una de estas cuestiones eminentemente especulativas es la siguiente: ¿Existe alguna conexión entre las leyes que gobiernan los átomos y las que gobiernan nuestro universo? Algunos hombres de ciencia creen que sí, y sir Arthur Eddington consagró muchos años de su vida a especulaciones relacionadas con este mismo problema. Sus opiniones son compartidas, al menos en cierto modo, por Schrödinger y Dirac, prominentes investigadores en el campo de la física moderna. En cambio, hay muchos físicos a quienes semejante idea les parece repulsiva y casi ridícula. No creen que el mundo microfísico de los átomos refleje en modo alguno el macrocosmos de nuestro universo. Hasta en la ciencia hay opiniones y gustos subjetivos. Mi opinión es que no existe conexión posible entre el microcosmos y el macrocosmos si nuestro universo es abierto, pero que puede haberla si nuestro universo es cerrado. La justificación de mi creencia tendría que ser demasiado técnica para este lugar. Pero aun cuando pudieran incluirse aquí los argumentos, éstos serían necesariamente demasiado vagos para convencer a quienes sustentan opiniones distintas. En la frontera de la ciencia en la que están trabajando los hombres, en la que sólo pueden verse andamiajes y predecirse con gran incertidumbre la arquitectura del futuro edificio, los científicos se muestran divididos en cuanto a sus puntos de vista. Sus divergentes opiniones pueden reflejar ambientes científicos diferentes y hasta distintas actitudes sociales.

Al hablar de nuestro universo y de las distancias entre las nebulosas —recuérdese: dos millones de años-luz— puede sentirse la tentación de asustar a quienes reciben tales informaciones con la soledad de la materia en el vasto espacio, con los misterios del universo, con la audacia de los sumos sacerdotes de la cultura que lo han vislumbrado, con el genio matemático de su Creador, con la insignificancia de nuestras vidas y de los asuntos humanos en comparación con la armonía y la belleza de la naturaleza. Todo eso, por supuesto, son puros desatinos, aun cuando los libros escritos con ese criterio se venderán muy bien mientras la gente estime las elucubraciones emotivas más que el punto de vista racional, y mientras considere la comprensión como un mezquino sustitutivo de las emociones metafísicas.

Vivimos en nuestra tierra y nada es tan importante para nosotros como el clima social, ético y económico en el que vivimos. Sobre nuestra tierra estuvieron nuestras cunas y estarán nuestras sepulturas. Aquí hemos de vivir con nuestros semejantes y aquí tenemos que hacer lo posible por construir un mundo mejor. Sin embargo, constituye una placentera evasión el elevarse por encima y más allá de nuestra tierra para contemplar problemas que tienen poco que ver con nuestra

vida cotidiana; pero sería necio regresar de ese viaje por el espacio y el tiempo con un sentimiento de desdén hacia lo que nos rodea por el hecho de que nuestra tierra es pequeña y de que las nebulosas se encuentran a grandes distancias. A mí me parece obvia la moraleja de ese viaje, como la de cualquier viaje realizado por el campo de la ciencia. El método científico combina la observación y la especulación, actúa desapasionadamente, rechazando las teorías inoperantes y aceptando y prosiguiendo las que dan resultado. Esta es la lección que podríamos aprender de la ciencia y aplicarla a nuestros asuntos sociales. Puede que para ello se necesite algún tiempo. No seamos demasiado pesimistas. Nuestro mundo es todavía joven, y en él, la ciencia sólo cuenta trescientos años.

La moderna descripción de nuestro universo, al igual que todas las creaciones científicas, es el resultado del trabajo de muchos hombres. Algunos de ellos han sido mencionados en nuestra historia. Citemos unos cuantos de los importantísimos nombres que han sido omitidos: el astrónomo holandés, de Sitter; el ruso Friedmann, el belga Lemaitre, el norteamericano Robertson. Pero hay también otros muchos. La ciencia es una aventura cooperativa que no conoce fronteras raciales o nacionales, y en la que los hombres de ciencia del mundo civilizado colaboran con éxito si se les permite hacerlo.